

METODE NERACA ENERGI UNTUK PERHITUNGAN INDEKS LUAS DAUN MENGUNAKAN DATA CITRA SATELIT MULTI SPEKTRAL

(Energy Balance Method for Determining Leaf Area Index Land Using Multi Spectral
Satellite Imaginary)

I. Risdiyanto & R.Setiawan

ABSTRAK

Indeks luas daun (ILD) merupakan suatu peubah yang menunjukkan hubungan antara luas daun dan luas bidang yang tertutupi. Secara konvensional penentuan nilai LAI dilakukan dengan mengukur dan mengakumulasi jumlah luas daun dalam satu bidang tertentu dan dibagi dengan luas bidang tersebut. ILD juga dapat diukur menggunakan alat ukur radiasi surya seperti *tube solari meter* yang dipasang paralel di atas dan di bawah tajuk tumbuhan. Kedua pendekatan tersebut mempunyai keterbatasan spasial, sehingga dicoba mengembangkan metode baru dengan teknik penginderaan jauh. Pendugaan ILD dengan teknik ini memanfaatkan sifat spektral dari permukaan baik yang bersumber dari radiasi gelombang pendek dari matahari maupun radiasi gelombang panjang dari permukaan. Salah satu metode yang dapat dikembangkan adalah pendekatan neraca energi untuk menghasilkan peubah-peubah penduga ILD menggunakan hukum Beer-Lambert. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai rata-rata ILD untuk lahan bervegetasi menggunakan metode neraca energi dan persamaan hukum Beer-Lambert untuk hutan alam sebesar 3.05 dengan nilai kisaran selang 2.85- 3.50 dan R^2 validasi dengan ILD lapangan sebesar 0.91. Nilai rata-rata LAI pendugaan untuk agroforest karet sebesar 3.01 dengan selang 2.79–3.40 dan nilai R^2 validasi sebesar 0.69, sedangkan nilai rata-rata ILD untuk perkebunan karet monokultur sebesar 2.96 dengan selang 2.74–3.28 dan nilai R^2 validasi sebesar 0.82. Metode pendugaan ILD ini dapat digunakan untuk lahan bervegetasi terutama untuk pertanaman homogen seperti hutan alam dan monokultur.

Kata kunci : ILD, neraca energi, albedo, transmisi

ABSTRAK

Leaf area index (LAI) is a variable showing relation between leaf area leaf and area closed over it. The conventionally technique to determine LAI value conducted by measure and accumulate wide of amount of leaf in one selected area and divided broadly area. The other technique, LAI also can be measured by using measuring instrument of solar radiation like attached tube solarimeter parallelly above and below/under plant canopy. Both of the approaches have limitation of spatial which developed new method with remote sensing technique. Determination of LAI with remote sensing technique exploits the nature of spectral of surface both from short wave (sun radiation) and long wave (surface radiation). One of the method able to be developed is surface energy balance approach with Beer-Lambert law. Result of this research indicate that value of LAI for the vegetation area by surface energy balance method and equation of Beer-Lambert law got value of mean LAI for natural forest equal to 3.05 with the range value 2.85 - 3.50 and R^2 is 0.91, for the rubber agroforest equal to 3.01 with range value 2.79 - 3.40 and R^2 is 0.69, while value of mean LAI for the plantation of monoculture of rubber equal to 2.96 with range value 2.74 - 3.28 and R^2 is 0.82. This method can be used for vegetation area especially for homogeneously like natural forest and monoculture.

Keywords: Leaf Area Index (LAI), energy balance, solar radiation, albedo, transmittion

Penyerahan naskah: 20 Juli 2007

Diterima untuk diterbitkan : 19 Agustus 2007

PENDAHULUAN

Indeks luas daun (ILD) merupakan suatu peubah yang menunjukkan hubungan antara luas daun dan luas bidang yang tertutupi. Laju perubahan nilai ILD sangat tergantung dengan kualitas metabolisme dalam pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, ILD sering digunakan sebagai indikator dalam pertumbuhan tanaman, yaitu sebagai salah satu peubah untuk mengetahui intensitas radiasi yang diintersepsi oleh daun sehingga dapat diduga nilai biomasnya. Handoko (1996) menggunakan peubah ILD untuk menghitung biomassa potensial dan evapotranspirasi maksimum dari suatu tanaman.

Secara konvensional penentuan nilai LAI dilakukan dengan mengukur dan mengakumulasi jumlah luas daun dalam satu bidang tertentu dan dibagi dengan luas bidang tersebut. Selain itu, ILD juga dapat diukur dengan menggunakan alat ukur radiasi surya seperti *tube solari meter* yang dipasang secara paralel di atas dan di bawah tajuk tumbuhan atau pun dengan menggunakan teknik plot contoh. Metode tersebut mudah dilakukan untuk pertanian seperti padi, jagung, kedelai, dan untuk areal vegetasi yang memiliki luasan tidak terlalu luas (Kusumaningrum, 2003). Sedangkan untuk areal yang lebih luas seperti perkebunan dan hutan penggunaan metode tersebut membutuhkan waktu, biaya, dan tenaga yang cukup besar. Untuk mengatasi kesulitan tersebut, maka dengan kemajuan teknologi penginderaan jauh pendugaan ILD dapat dilakukan secara spasial yang mencakup areal yang luas.

Curran *et al*, 1992 ; Peddle *et al*, 1999 melakukan pendugaan ILD dengan dengan respon spektral dari sensor satelit penginderaan jauh yang kemudian hasilnya dikorelasikan dengan hasil observasi. Pendekatan lain yang menggunakan satelit penginderaan jauh adalah dengan menggunakan *normalized difference vegetation index* (NDVI). Sebagian besar pendugaan ILD dengan pendekatan NDVI dilakukan untuk jenis tanaman *semi-arid* dan tanaman pertanian yang memiliki penutupan kanopi kurang dari 100%. Namun pendekatan NDVI kurang sensitif dalam menduga nilai ILD pada lahan bervegetasi yang memiliki kondisi penutupan kanopi yang berbeda-beda (Chen, 1999 ; Turner *et al*, 1999). Hal ini dikarenakan, nilai NDVI hanya merepresentasikan proyeksi horizontal dari suatu tajuk tanaman. Sehingga luasan daun yang dapat diduga dengan metode tersebut hanya bagian atas dari suatu tajuk tanaman.

Guna mereduksi kesalahan-kesalahan yang timbul dalam pendugaan ILD dengan data satelit penginderaan jauh, maka dalam penelitian ini dikembangkan suatu metode pendugaan ILD yang memungkinkan pengukuran sampai pada bagian bawah dari tajuk tanaman. Metode yang dikembangkan adalah pendekatan neraca energi dan pendekatan hukum Beer-Lambert. Pendekatan neraca energi dikembangkan dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik pada kisaran spektral tampak (radiasi gelombang pendek) yang dipantulkan permukaan daun dan nilai gelombang panjang yang diemisikan oleh permukaan daun. Untuk menguji keakuratan nilai ILD dengan metode tersebut, maka dilakukan pengujian pada tiga ekosistem yang berbeda, yaitu; agroforest karet, kebun karet monokultur, dan hutan alam yang terdapat di Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. Hasil akhir ILD akan divalidasi dengan data ILD hasil pengukuran langsung di lapangan.

Penelitian bertujuan menyusun metode perhitungan refleksi, absorpsi, dan transmisi radiasi pada permukaan lahan bervegetasi menggunakan citra satelit Landsat ETM+ dan Menyusun metode perhitungan LAI dengan pendekatan neraca energi dari data citra satelit Landsat ETM+.

METODOLOGI

Suhu Permukaan (*Surface Temperature*)

Suhu permukaan dihitung setelah dilakukan pemrosesan awal citra satelit yang meliputi *import* data citra, koreksi radiometrik, *image enhancement* dan klasifikasi penutup lahan di daerah kajian. Untuk menduga suhu permukaan dari citra satelit Landsat ETM+ digunakan band 6 yang memiliki panjang gelombang 10.40 - 12.50 μm (*thermal infrared*) dengan menggunakan persamaan Planck dengan dua konstanta kalibrasi. Konstanta kalibrasi data citra Landsat ETM+ untuk nilai $K_1 = 666.09 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ dan $K_2 = 1282.71 \text{ K}$ (USGS, 2002).

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \dots\dots\dots (1)$$

Selanjutnya nilai T_B tersebut dikoreksi dengan emisivitas benda melalui persamaan (Weng, 2001) :

$$T_s(\text{koreksi}) = \frac{T_s}{1 + \left(\frac{\lambda T_s}{\partial}\right) \ln \varepsilon} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

- T_s : Suhu permukaan yang terkoreksi (K)
- λ : Panjang gelombang radiasi emisi (11,5 μm)
- ∂ : hc/∂ ($1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$)
- h : Konstanta Planck's ($6.26 \times 10^{-34} \text{ J sec}$)
- c : Kecepatan cahaya ($2.998 \times 10^8 \text{ m.sec}^{-1}$)
- ε : Emisivitas objek (Nilai emisivitas untuk lahan non vegetasi yaitu sekitar 0.92, untuk lahan vegetasi sekitar 0.95, dan nilai emisivitas untuk air sekitar 0.98 (Weng, 2001).

Neraca Energi permukaan

Komponen neraca energi terdiri dari albedo, radiasi netto, fluks pemanasan permukaan (G), fluks pemanasan udara (H), fluks pemanasan laten (λE), dan evapotranspirasi. Namun dalam penelitian ini hanya mengkaji albedo dan komponen radiasi netto saja, karena kedua informasi nilai tersebutlah yang diperlukan untuk menduga nilai LAI.

Radiasi Gelombang Pendek dan Albedo

Energi radiasi gelombang pendek yang dipantulkan oleh suatu permukaan (R_s^\uparrow), dapat diduga dari sensor satelit yang menerima kisaran panjang gelombang pendek. Pada citra satelit Landsat kisaran panjang gelombang pendek diterima oleh kanal *visible* (1, 2 dan 3). Albedo (∂) merupakan perbandingan jumlah radiasi yang dipantulkan dengan jumlah energi radiasi surya yang diterima oleh suatu permukaan. Energi yang dipantulkan oleh suatu permukaan memiliki panjang gelombang yang pendek, sehingga sensor yang digunakan untuk menghitung albedo adalah sensor yang menerima panjang gelombang pendek. Persamaan pendugaan albedo dari citra Landsat dalam USGS (2002) adalah :

$$\partial = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta} \dots\dots\dots(3)$$

Pada data satelit, diketahuinya nilai albedo dan jumlah energi radiasi gelombang pendek yang dipantulkan oleh suatu permukaan, sehingga besarnya radiasi gelombang pendek yang diterima permukaan dapat diperoleh dengan persamaan :

$$R_s^{\downarrow} = \frac{R_s^{\uparrow}}{\partial} \dots\dots\dots(4)$$

Radiasi Gelombang Panjang

Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh permukaan diturunkan dengan persamaan Stefan-Boltzman, dimana e = emisivitas, σ = Tetapan Stefan-boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) dan T_s merupakan suhu permukaan objek (K).

$$R_l = e \sigma T_s^4 \dots\dots\dots(5)$$

Sifat Optik Kanopi

Nilai sifat optikal kanopi terdiri dari nilai reflektivitas kanopi, absorpsivitas kanopi, dan transmisivitas kanopi.

- **Reflektivitas (ρ)**; nilai energi yang direfleksikan dari permukaan dihitung berdasarkan nilai albedo permukaan dari radiasi surya pada kisaran gelombang tampak (eq. 4).
- **Emisi (ε) dan Absorpsi (α)** ; jumlah energi yang dipancarkan oleh suatu permukaan sebanding dengan yang telah diserapnya dengan tingkat efisiensi tertentu. Sebagai dasar dari pernyataan tersebut adalah Hukum Kirchhoff dalam perpindahan panas menyatakan bahwa untuk setiap permukaan, harga angka penyerapannya (absorpsi) sama dengan angka emisi pada suhu dan panjang gelombang yang sama. Sehingga, persamaan yang digunakan adalah,

$$\varepsilon \approx \alpha \approx e(R_s^{\downarrow} - \rho) \dots\dots\dots(6)$$

Dimana nilai e merupakan konstanta emisivitas untuk masing-masing penutup lahan

- **Transmisivitas (τ)** ; Untuk mendapatkan nilai radiasi matahari yang ditransmisikan oleh suatu permukaan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$\tau = R_s^{\downarrow} - \rho - \alpha \dots\dots\dots(7)$$

Indeks Luas Daun (ILD)

ILD dapat dihitung melalui hukum Beer-Lambert yang menjelaskan hubungan empiris dari cahaya yang meradiasi sebuah permukaan homogen yang menyerap serta meneruskan radiasi dari cahaya tersebut. Berdasarkan prinsip kerja hukum tersebut maka dalam penelitian ini, permukaan kanopi tumbuhan bersifat homogen (hutan alam, agroforest karet, dan perkebunan karet monokultur) yang dapat merefleksikan, mengabsorpsi dan mengtransmisikan radiasi surya. Dengan

mengetahui besarnya radiasi surya di permukaan kanopi dan radiasi pada lapisan dengan ketinggian tertentu dalam kanopi serta nilai dari suatu koefisien pemadaman, maka dapat diketahui besarnya suatu nilai ILD dengan pendekatan hukum Beer-Lambert adalah.

$$ILD = ((Ln \frac{I}{I_0}) / (-k)) \dots \dots \dots (8)$$

Dimana :

- I = Radiasi pada lapisan dengan ketinggian tertentu dalam kanopi (radiasi yang ditransmisikan oleh suatu kanopi (τ)).
- I_0 = Radiasi di permukaan kanopi (R_s^\downarrow)
- k = Koefisien pemadaman (nilai koefisien pemadaman berkisar antara 0,3 – 0,5 untuk daun vertikal serta 0,7 – 1,0 untuk daun horisontal (June, 1999) dan dalam penelitian ini nilai koefisien pemadaman yang digunakan adalah 1.0)
- ILD = Indeks luas daun.

Validasi Nilai LAI

Validasi dilakukan untuk mengetahui sejauh mana perbedaan antara nilai LAI hasil penurunan neraca energi dari citra satelit Landsat ETM+ dengan data LAI hasil pengukuran langsung di lapang. Sebelum melakukan validasi, dilakukan proses penggabungan data lapangan dan data penginderaan jauh. Proses ini dilakukan karena pada penentuan titik di citra digital, data memiliki kekurangan yaitu adanya penyimpangan yang disebabkan adanya distorsi geometrik. Metode yang dilakukan untuk mengurangi kesalahan tersebut adalah dengan cara menggunakan metode 9 piksel di sekitar piksel contoh. Hal ini dilakukan karena penyimpangan yang terjadi tidak sistematis atau menyimpang acak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Spasial Suhu Permukaan

Pendugaan suhu permukaan menggunakan citra Landsat ETM+ yang diakuisisi pada 15 Agustus 2002 di daerah studi untuk tipe penutup lahan non vegetasi mempunyai kisaran 26 - 35 °C dengan suhu rata-rata berkisar 29.5 °C. Sedangkan pada penutupan lahan vegetasi (hutan alam, agroforest karet, perkebunan karet monokultur, perkebunan kelapa sawit, semak belukar, tumbuhan paku-pakuan, dan sawah) mempunyai kisaran suhu permukaan sekitar 18 - 32 °C dengan suhu rata-rata terendah dimiliki oleh penutup lahan hutan alam (23.9 °C) dan tertinggi dimiliki oleh penutup lahan sawah (28.4 °C), sedangkan suhu permukaan untuk badan air berada pada kisaran 22 - 32 °C dengan suhu rata-ratanya sebesar 26.9 °C (Tabel 1).

Perbedaan suhu permukaan pada beberapa penutup lahan seperti ditunjukkan oleh Tabel 2 disebabkan oleh sifat fisik permukaan seperti kapasitas panas jenis dan konduktivitas *thermal*. Tipe penutup lahan non vegetasi mempunyai kapasitas panas jenis rendah, sedangkan konduktivitas *thermal*-nya tinggi. Sehingga, pada waktu yang bersamaan dengan jumlah masukan energi yang sama akan memberikan respon perubahan suhu permukaan yang berbeda dan menyebabkan suhu permukaannya lebih tinggi.

Tabel 1. Kisaran nilai suhu permukaan ($^{\circ}\text{C}$) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	Suhu Permukaan ($^{\circ}\text{C}$)		
	Min	Max	Mean
Hutan alam	18	29	23.9
Agroforest Karet	21	28	24.5
Monokultur Karet	22	28	25.5
P. Kelapa Sawit	24	28	25.3
Semak Belukar	25	29	25.8
T. Paku-Pakuan	25	30	26.7
Sawah	25	32	28.4
Pemukiman	26	35	29.5
Badan Air	22	32	26.9

Distribusi Spasial Komponen Neraca Energi

Albedo

Lahan pemukiman memiliki albedo sebesar 0.09, sedangkan nilai rata-rata albedo pada tipe penutup lahan bervegetasi berkisar 0.054 – 0.077, dan untuk penutup lahan berupa badan air memiliki nilai albedo 0.189. Tipe penutup lahan non vegetasi mempunyai nilai rata-rata albedo yang lebih tinggi dibandingkan tipe penutup lahan bervegetasi (hutan alam, agroforest karet, perkebunan karet monokultur, perkebunan kelapa sawit, tumbuhan paku-pakuan, semak belukar, dan sawah). Hal ini disebabkan lebih banyak energi radiasi gelombang pendek yang dipantulkan kembali oleh penutup lahan non vegetasi dibandingkan dengan penutup lahan bervegetasi.

Tabel 2. Kisaran nilai albedo (*unitless*) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	Albedo (<i>Unitless</i>)		
	Min	Max	Mean
Hutan alam	0.043	0.056	0.054
Agroforest Karet	0.048	0.058	0.054
Monokultur Karet	0.051	0.065	0.058
P. Kelapa Sawit	0.052	0.070	0.061
T. Paku-Pakuan	0.057	0.077	0.067
Semak Belukar	0.057	0.077	0.065
Sawah	0.066	0.090	0.077
Pemukiman	0.070	0.140	0.090
Badan Air	0.141	0.257	0.189

Radiasi Netto.

Hasil ekstraksi nilai rata-rata komponen radiasi netto (radiasi gelombang pendek dan radiasi gelombang panjang) dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Nilai R_s^{\downarrow} berperan sebagai salah satu input dalam perhitungan ILD dengan persamaan hukum Beer-Lambert, fungsi R_s^{\downarrow} sebagai radiasi di permukaan kanopi setiap penutup lahan bervegetasi (I_0). Semakin berkurangnya kerapatan kanopi

tumbuhan bervegetasi yang menutupi lahan dan berbedanya nilai emisivitas masing-masing penutup lahan membuat semakin besarnya energi radiasi gelombang pendek dan panjang yang dipantulkan.

Perbedaan penerimaan R_n pada tiap tipe penutup lahan, dipengaruhi oleh albedo, radiasi gelombang pendek dan radiasi gelombang panjang. Pada Penutup lahan pemukiman memiliki nilai albedo dan suhu permukaan yang lebih tinggi, sehingga mengakibatkan energi radiasi gelombang pendek yang diterima rendah dan energi radiasi gelombang panjang yang dipancarkan tinggi, sehingga radiasi nettoanya rendah.

Tabel 3. Kisaran nilai komponen radiasi netto (Wm^{-2}) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	Komponen R_n (Wm^{-2})		
	R_s^{\downarrow}	R_s^{\uparrow}	R_L^{\uparrow}
Hutan alam	850.0	43.0	444.2
Agroforest Karet	849.5	44.0	448.3
Monokultur Karet	849.7	45.0	453.0
P. Kelapa Sawit	849.0	51.0	455.0
Semak Belukar	848.5	54.4	458.9
T. Paku-Pakuan	848.8	56.6	461.7
Sawah	850.5	65.3	470.0
Pemukiman	849.6	78.7	479.4
Badan Air	849.5	161.6	465.7

Tabel 4. Kisaran nilai R_s , R_L , dan R_n (Wm^{-2}) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	Komponen R_n (Wm^{-2})		
	R_s	R_L	R_n
Hutan alam	807.2	444.2	359.9
Agroforest Karet	804.0	448.3	355.7
Monokultur Karet	800.7	453.0	347.7
P. Kelapa Sawit	797.4	455.0	341.5
T. Paku-Pakuan	791.5	461.7	329.8
Semak Belukar	793.6	458.9	334.7
Sawah	784.8	470.0	314.7
Pemukiman	770.7	479.4	293.1
Badan Air	687.5	465.7	277.4

Hubungan antara suhu permukaan dengan albedo menunjukkan korelasi positif dan berkorelasi negatif nilai radiasi netto. Semakin besar nilai suhu permukaan dan albedo suatu penutup lahan membuat semakin kecil radiasi netto yang dimiliki oleh penutup lahan tersebut (Tabel 5)

Tabel 5. Kisaran nilai rata-rata suhu permukaan ($^{\circ}\text{C}$), Albedo (*unitless*), dan R_n (Wm^{-2}) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	Suhu	α	R_n
Hutan alam	23.9	0.054	359.9
Agroforest Karet	24.5	0.054	355.7
Monokultur Karet	25.5	0.058	347.7
P. Kelapa Sawit	25.3	0.061	341.5
T. Paku-Pakuan	26.7	0.067	329.8
Semak Belukar	25.8	0.065	334.7
Sawah	28.4	0.077	314.7
Pemukiman	29.5	0.090	293.1
Badan Air	26.9	0.189	277.4

Sifat Optik Kanopi

Penggunaan nilai albedo yang dihasilkan dari ekstraksi data satelit pada kisaran gelombang tampak menghasil nilai ρ untuk vegetasi hutan, agroforest karet, dan monokultur karet secara berturut-turut adalah 43 Wm^{-2} , 44 Wm^{-2} , dan 45 Wm^{-2} . Nilai nilai tersebut menunjukkan jumlah radiasi surya gelombang pendek yang dipantulkan oleh permukaan (Tabel 6). Pendekatan hukum Kirchhoff (eq.6) menghasilkan energi radiasi surya pada kisaran gelombang tampak yang diabsorbsikan oleh permukaan penutup lahan. Nilai energi radiasi yang diabsorbsi secara berturut-turut untuk penutup lahan hutan alam, agroforest karet dan perkebunan karet monokultur adalah 766.8 Wm^{-2} , 763.8 Wm^{-2} , dan 760.7 Wm^{-2} . Sehingga untuk energi radiasi matahari yang ditransmisikan oleh kanopi hutan alam (40 Wm^{-2}) nilainya lebih kecil bila dibandingkan dengan kanopi agroforest karet (42 Wm^{-2}) dan perkebunan karet monokultur (44 Wm^{-2}).

Tabel 6. Konstanta emisivitas (*unitless*), ε_i (Wm^{-2}), τ (Wm^{-2}), dan ρ (Wm^{-2}) tiap penutup lahan.

Penutup Lahan	e	ε	τ	ρ
Hutan alam	0.95	766.8	40	43
Agroforest Karet	0.95	763.8	42	44
Monokultur Karet	0.95	760.7	44	45

Pendugaan Indeks Luas Daun (ILD)

Data ILD hasil pengukuran di lapangan yang diperoleh dari penelitian sebelumnya dilakukan dengan menggunakan *hemispherical photograph (hemiphot)*. Data yang diambil berupa data bukaan tajuk, dan kemudian diolah menggunakan *software Hemiview* versi 2.1. Nilai ILD hasil pengukuran di lapangan tersebut (Tabel 7), merupakan presentasi dari penutupan kanopi yang menutupi areal yang berada di bawah penutupan tajuk yang diproyeksikan secara vertikal dengan bidang tepat di bawah penutupan tajuk.

Tabel 7. Sebaran nilai LAI hasil pengukuran di lapangan (*unitless*)

Penutup Lahan	Selang ILD
Hutan alam	2.8 – 4.1
Agroforest Karet	1.5 – 3.6
Monokultur Karet	1.4 – 3.4

Sumber : Marwan Djumhaer, 2003.

Pendugaan ILD dengan menggunakan persamaan hukum Beer-Lambert dengan nilai-nilai radiasi yang dihasilkan dari metode neraca energi didapatkan untuk penutup lahan jenis hutan alam, agroforest karet, dan perkebunan karet secara berturut-turut adalah 3.05, 3.01, dan 2.96. Perbandingan dengan hasil pengukuran di lapangan (Tabel 8), menunjukkan bahwa nilai rata-rata ILD yang diduga dengan data satelit berada diantara selang nilai hasil pengukuran di lapangan. Pendugaan nilai ILD dengan komponen nilai per pixel dari citra satelit Landsat ETM+, maka didapatkan sebaran nilai pendugaan ILD untuk penutup lahan hutan alam berkisar antara 2.85-3.50, LAI agroforest karet berkisar antara 2.79-3.40, dan untuk perkebunan karet monokultur berkisar antara 2.74-3.28.

Tabel 8. Sebaran nilai rata-rata ILD (*unitless*)

Penutupan Lahan	Nilai Rata-Rata LAI Pendugaan	Selang LAI Pengukuran Di Lapangan
Hutan alam	3.05	2.8 - 4.1
Agroforest Karet	3.01	1.5 - 3.6
Monokultur Karet	2.96	1.4 - 3.4

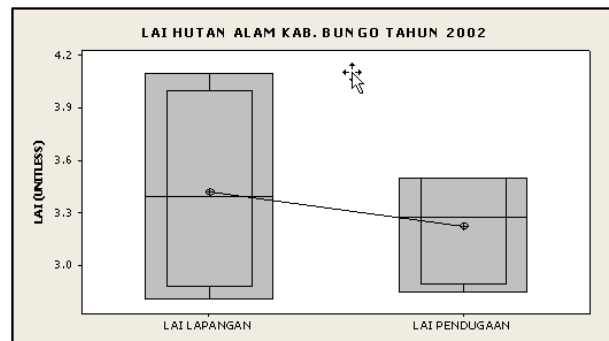
Tabel 9. Sebaran nilai ILD (*unitless*) hasil pendugaan dan pengukuran di lapangan

Penutupan Lahan	Selang LAI Pendugaan	Selang LAI Pengukuran
Hutan alam	2.85 - 3.50	2.8 – 4.1
Agroforest Karet	2.79 – 3.40	1.5 – 3.6
Monokultur Karet	2.74 – 3.28	1.4 – 3.4

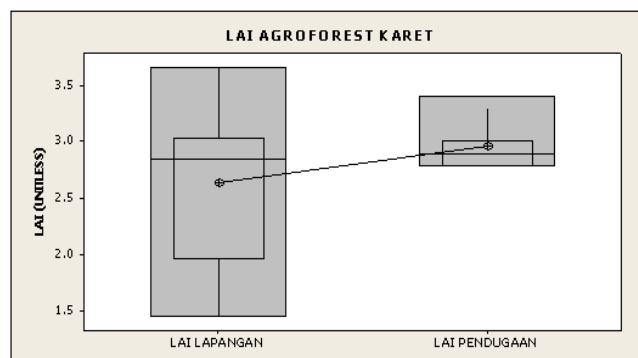
Validasi Data ILD

Perbandingan antara ILD lapangan dengan hasil pendugaan untuk hutan alam diberikan dalam bentuk *boxplot* (Gambar 1). Perbandingan tersebut menunjukkan kisaran *range box*, *interquartile range box*, *mean simbol*, dan *mean connect line*. Berdasarkan *boxplot* tersebut, ditunjukkan kisaran selang nilai ILD hasil pendugaan yang berada di dalam selang nilai pengukuran di lapangan. Bila kedua data tersebut divalidasi dengan analisa korelasi statistik, maka didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.91. Gambar 2 menunjukkan bahwa kisaran selang ILD agroforest karet hasil pendugaan berada di dalam selang hasil pengukuran langsung di lapangan. Bila kedua data tersebut divalidasi dengan analisa korelasi statistik, maka didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.69. Sama seperti hasil yang diperoleh dari *boxplot* untuk hutan alam dan agroforest karet, kisaran nilai ILD karet monokultur hasil pendugaan juga berada diantara kisaran selang hasil pengukuran di lapangan dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari hasil validasi antara ILD pendugaan dengan data lapangan untuk penutup lahan jenis perkebunan

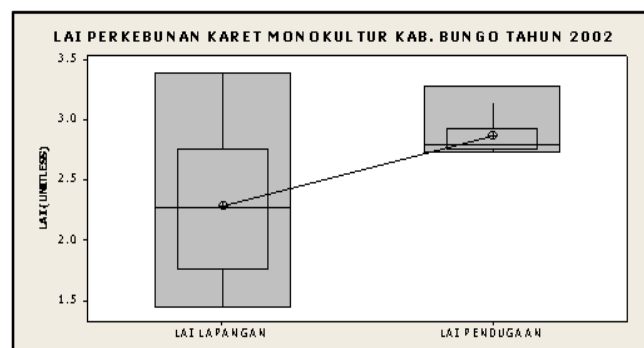
karet monokultur lebih besar yaitu 0.82 dibanding dengan hasil validasi pada agroforest karet (Gambar 3).



Gambar 1. Boxplot LAI hutan alam hasil pendugaan dan pengukuran langsung di lapangan.



Gambar 2. Boxplot LAI agroforest karet hasil pendugaan dan pengukuran langsung di lapangan.



Gambar 3. Boxplot LAI karet monokultur hasil pendugaan dan pengukuran langsung di lapangan.

Perbandingan hasil pendugaan ILD pada ketiga jenis tutupan lahan tersebut dengan metode yang dikembangkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa sifat homogenitas dari masing-masing tutupan lahan sangat mempengaruhi akurasi nilai pendugaan. Hal ini dapat dilihat pada nilai koefisien determinasi dari masing-masing jenis tutupan lahan. Homogenitas tutupan lahan pada agroforests karet lebih rendah jika dibandingkan dengan monokultur karet dan hutan alam.

Secara keseluruhan selang nilai ILD hasil pendugaan untuk ketiga jenis penutup lahan yang berbeda di atas selalu berada diantara kisaran selang hasil pengukuran langsung di lapangan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik radiometrik dari data penginderaan jauh (citra satelit Landsat ETM+) yang dipengaruhi oleh topografi permukaan penutup lahan yang mengakibatkan perbedaan nilai ILD pada koordinat areal penutup lahan yang sama. Pada daerah kajian yang memiliki topografi bergelombang (daerah perbukitan) dapat menimbulkan adanya bayangan yang disebabkan perbedaan ketinggian pada daerah puncak bukit dan daerah lembah. Pada daerah puncak bukit nilai spektral akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan daerah lembah, karena daerah lembah akan tertutup oleh bayangan puncak bukit.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan hubungan searah antara suhu permukaan dengan albedo. Kedua komponen tersebut memiliki hubungan yang berlawanan arah dengan nilai radiasi netto. Semakin besar nilai suhu permukaan dan albedo suatu penutup lahan maka nilai radiasi netto penutup lahan tersebut menjadi semakin kecil. Hasil ekstraksi radiasi netto untuk penutup lahan non vegetasi sebesar 293.1 Wm^{-2} , yang berarti lebih rendah jika dibandingkan dengan penutup lahan bervegetasi yang memiliki radiasi netto sekitar $359.9 - 314.7 \text{ Wm}^{-2}$, sedangkan nilai radiasi netto untuk badan air berada di bawah nilai radiasi netto untuk penutup lahan non-vegetasi dan bervegetasi yaitu sebesar 277.4 Wm^{-2} .

Dengan menggunakan pendekatan yang dikembangkan dalam penelitian ini, didapatkan nilai energi radiasi surya yang direfleksikan sebesar 43 Wm^{-2} (hutan alam), 44 Wm^{-2} (agroforest karet), dan 45 Wm^{-2} (perkebunan karet monokultur). Nilai energi radiasi surya yang diemisikan (equivalen dengan radiasi surya yang diabsorbsikan) sebesar 766.8 Wm^{-2} (hutan alam), 763.8 Wm^{-2} (agroforest karet), dan 760.7 Wm^{-2} (perkebunan karet monokultur). Selain itu juga diperoleh besarnya energi surya yang ditransmisikan oleh kanopi hutan alam (40 Wm^{-2}), kanopi agroforest karet (42 Wm^{-2}) dan perkebunan karet monokultur (44 Wm^{-2}).

Hasil penelitian yang dapat diperoleh dari penduga nilai ILD untuk lahan bervegetasi menggunakan metode neraca energi dan persamaan hukum Beer-Lambert adalah nilai mean ILD hutan alam sebesar 3.05 dengan nilai kisaran selang 2.85 - 3.50 dan R^2 hasil validasi dengan ILD lapangan sebesar 0.91. Nilai mean LAI pendugaan untuk agroforest karet sebesar 3.01 dengan selang 2.79 - 3.40 dan nilai R^2 hasil validasi sebesar 0.69, sedangkan nilai mean ILD untuk perkebunan karet monokultur sebesar 2.96 dengan selang 2.74 - 3.28 dan nilai R^2 hasil validasi sebesar 0.82. Dengan hasil luaran yang cukup baik, metode pendugaan ILD tersebut dapat digunakan untuk penutup lahan bervegetasi terutama untuk pertanian dengan homogen seperti hutan alam dan monokultur.

Perhitungan komponen neraca energi, suhu permukaan, nilai absorpsi, dan transmisivitas dari data citra satelit Landsat ETM+ masih banyak menggunakan asumsi-asumsi sehingga berpotensi sebagai faktor penyebab kesalahan dalam melakukan perhitungan. Penelitian pendugaan

ILD dengan menggunakan metode neraca energi hasil penurunan citra satelit Landsat ETM+ dapat diaplikasikan untuk tempat maupun objek kajian yang berbeda dengan menggunakan citra satelit yang memiliki resolusi spasial yang lebih besar seperti (citra satelit IKONOS, Quickbird) dan dengan melakukan *ground check* di lapangan sehingga dapat mengurangi kesalahan-kesalahan yang bersifat spasial.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, J. M., and S.G. LeBlanc, J.R. Miller, J. Freemantle, S.E. Loechel, C.L. Walthall, K.A. Innanen, H.P. White. 1999. Compact airborne spectrographic imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests. Jour. Of Geophysical Research. 104 D22:27945-27958.
- Curran, P.J., J. Dungan, and H.L. Gholz. 1992. Seasonal LAI measurements in slash pine using Landsat TM. Remote Sensing of Environment 39: 3-13.
- Djumhaer, Marwan. 2003. Pendugaan Leaf Area Index dan Luas Bidang Dasar Tegakan Menggunakan Landsat 7 ETM+ (studi kasus di Kabupaten Bungo Propinsi Jambi). Skripsi. Jurusan Manajemen hutan, FAHUTAN IPB, Bogor. Tidak Dipublikasikan.
- Handoko, I. 1994. Dasar Penyusunan dan Aplikasi Model Simulasi Komputer untuk Pertanian. Jurusan Geofisika dan Meteorologi.
- June, T. 1999. Ekofisiologi tanaman. Pelatihan Dosen-dosen Perguruan Tinggi Negeri Indonesia Bagian Barat dalam Bidang Agrometeorologi. Bogor 1-12 Februari 1999. Bogor.
- Kusumaningrum, B. 2003. Pendugaan NPP (Net Primary Production) Ekosistem Hutan di Sumatra Barat, Riau, dan Jambi Dengan Memanfaatkan Data NOAA/AVHRR. Skripsi. Jurusan Geofisika dan Meteorologi FMIPA IPB, Bogor. Tidak Dipublikasikan.
- Peddle, D.R., F.R. Hall, and E.F. LeDrew. 1999. Spectral mixture analysis and geometric-optical reflectance modeling of boreal forest biophysical structure. Remote Sensing of Environment 67: 288-297.
- Turner, D., W. Cohen, R. Kennedy, K. Fassnacht, and J. Briggs. 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. Remote Sensing of Environment 70: 52-68.
- USGS. 2002. Landsat 7 Science Data Users Handbook. http://tpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_https/chapter111.html.
- Weng, Q. 2001. A remote sensing – GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface Temperature in the Zhujiang Delta, China. Int. J. Remote Sensing. Vol. 22. No. 10 : 1999-2014.